

7. Резников А. Н., Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
8. Пат. № TJ 473. Республика Таджикистан, МПК (2011.01) G 01 N5/02. Способ определения коэффициентов самодиффузии и массоотдачи дисперсных материалов / А. А. Хушвактов., М. М. Сафаров, Д. С. Джураев. – № TJ 473; заявл. 11.10.2011; опубл. 02.11.2011, – 4 с.
9. Хушвактов, А. А., Сафаров М.М., Джураев Д.С. Изменение коэффициента самодиффузии и количества диффундируемых молекул воды в ультрадисперсных никелевых катализаторах на основе силикагеля // Вестник Таджикского технического университета. – Душанбе, – 2011. – № 4. – С. 5–10.
10. Голдаев С.В., Хушвактов, А. А. Совершенствование методик расчета характеристик осушителей воздуха с использованием силикагеля // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2014. – № 7-8. – С. 14–22.

УДК 536.24

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕГРУЗКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

Григорьева М.М., Иванова Е.В., Стрижак П.А.  
Томский политехнический университет, Томск

По статистическим данным электротехническая продукция воспламеняется чаще всего [1]. Провод и кабели занимают первое место по количеству пожаров, жертв и порче имущества среди всех типов электротехнической продукции [2 - 4].

Причиной возгорания кабелей чаще всего является перегрев проводников вследствие короткого замыкания или перегрузки. Это происходит из-за возгорания изоляции. Концентрация кабелей в ограниченном пространстве может привести к серьезным повреждениям в случае пожара. Пожарная безопасность кабельных линий в значительной степени определяется состоянием включения кабеля в перегородку между помещениями и состоянием изоляции.

На сегодняшний день, оценка пожарной опасности кабельных изделий осуществляется на предположении, что сечение проводника имеет постоянную температуру. Принимается во внимание только изменение температуры кабеля во времени. Этот подход является слишком упрощенным и, как правило, используется для определения временных характеристик пиролиза и воспламенения изоляции при перегрузках кабельных линий. Недостатком, описанным в [5] модели, является то, что он игнорирует условия, когда теплообмен с окружающей средой затруднен (кабель замурован в стене или проходит в коробе). Таким образом, не существует методов прогнозирования пожарной опасности кабельных линий с ограниченным теплоотводом и при перегрузках.

Целью данной работы является оценка пожарной опасности кабельных линий при перегрузке с ограниченной теплоотдачей на основе математического моделирования нестационарных температурных полей.

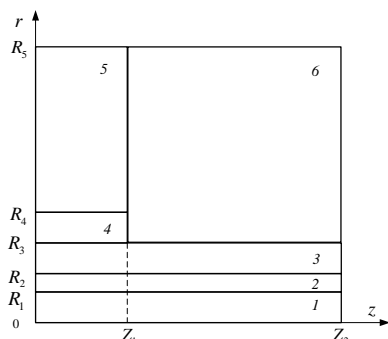


Рис. 1. Схема области постановки задачи: 1 – проводник; 2 – изоляция; 3 – кабельная; 4 – кабельная проходка; 5 – перегородка (стена); 6 – смесь воздуха и компонентов термического разложения материалов оболочки и изоляции кабеля

ты в другую, часть его замурована в стене (перегородке) с применением заделочного материала (герметика). Геометрия представленной постановки задачи показана на рис. 1.

Рассматривается следующая схема процесса. Проводник нагревают до температуры, превышающей допустимую, как при электрических перегрузках. Происходит нагрев материала оболочки кабеля и герметика кабельной изоляции. При определенной температуре  $T_p$ , характерной для каждого материала и близкой температуре воспламенения  $T_v$ , химические реакции, термическое разложение материала оболочки и кабельной изоляции протекают интенсивнее. Продукты термического разложения смешиваются с воздухом и нагреваются выделяющимся теплом. При достижении критической температуры и концентрации продуктов термического разложения в воздухе происходит воспламенение.

Математическая модель, соответствующая сформулированной физической постановке задачи, включает систему дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности для каждого слоя системы (рис. 1), уравнение энергии для смеси воздуха и компонентов термического разложения, уравнение диффузии компонентов термического разложения в среду кислорода.

Рассматривается одножильный кабель с изоляцией и оболочкой. Выбор связан с тем, что наличие нескольких жил не влияет на изменение температуры вследствие высокой теплопроводности металлов, из которых они изготовлены. Многослойная изоляция может быть представлена в виде одного слоя в постановке задачи, так как большинство изоляционных материалов имеют аналогичные значения тепловых характеристик. Принимается, что кабель проходит из одной комнаты в другую, часть его замурована в стене (перегородке) с применением заделочного материала (герметика). Геометрия представленной постановки задачи показана на рис. 1.

Поскольку в большинстве случаев кабель – это многослойный цилиндр, система уравнений теплопроводности записана в цилиндрических координатах. В уравнении энергии для проводника учтено выделение тепла, которое вызвано перегрузками и изменением электрического сопротивления материала жилы при изменении температуры.

Уравнение энергии для жилы:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + \frac{I^2 \gamma}{S}, \quad (1)$$

$$0 < r < R_1, 0 < z < Z_2.$$

Уравнение теплопроводности для изоляции:

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$R_1 < r < R_2, 0 < z < Z_2.$$

Термическое разложение материала оболочки кабеля и герметика, которым кабель крепится к стене, описывается уравнением Аррениуса [6]. Предполагается, что в интервале температур  $T_p \dots T_v$  энергия активации термического разложения остается постоянной. Изменение теплофизических свойств материалов в процессе термического разложения не рассматривалось.

Уравнение энергии для кабельной оболочки:

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) + q_3 \rho_3 \frac{d\varphi_3}{dt}, \quad (3)$$

$$R_2 < r < R_3, 0 < z < Z_2,$$

$$-\frac{d\varphi_3}{dt} = \varphi_3 k_3^0 \exp \left( -\frac{E_3}{RT_3} \right).$$

Уравнение энергии для кабельной изоляции (герметик):

$$\rho_4 C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_4}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right) + q_4 \rho_4 \frac{d\varphi_4}{dt}, \quad (4)$$

$$R_3 < r < R_4, 0 < z < Z_4,$$

$$-\frac{d\varphi_4}{dt} = \varphi_4 k_4^0 \exp \left( -\frac{E_4}{RT_4} \right).$$

Уравнение теплопроводности для переборок (стены):

$$\rho_5 C_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_5 \left( \frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_5}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} \right),$$

$$R_4 < r < R_5, 0 < z < Z_1. \quad (5)$$

Уравнение энергии для смеси компонентов кислорода и термического разложения:

$$\rho_6 C_6 \frac{\partial T_6}{\partial t} = \lambda_6 \left( \frac{\partial^2 T_6}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_6}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_6}{\partial z^2} \right) + Q_o W_o, \quad R_3 < r < R_5, Z_1 < z < Z_2. \quad (6)$$

Уравнение диффузии для термического разложения в среде кислорода:

$$\rho_6 \frac{\partial C_g}{\partial t} = \rho_6 D_6 \left( \frac{\partial^2 C_g}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_g}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} \right) - W_o, \quad R_3 < r < R_5, Z_1 < z < Z_2. \quad (7)$$

В системе уравнений (1) – (7) приняты следующие обозначения:  $\rho_i$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  $C_i$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;  $R_i$  – радиус, м;  $S$  – сечение жилы, м<sup>2</sup>;  $Z_1$  – толщина стены, м;  $Z_2$  – длина кабеля, м;  $T_i$  – текущее значение температуры, К;  $k_i^0$  – предэкспонент химической реакции термического разложения, 1/с;  $E_i$  – энергия активации химической реакции термического разложения, Дж/моль;  $q_i$  – теплота газификации материала, Дж/кг;  $\phi_i$  – текущее значение объемной доли компонента, подвергающегося термическому разложению;  $Q_o$  – тепловой эффект химической реакции окисления, Дж/кг;  $W_o$  – массовая скорость химической реакции окисления, кг/м<sup>3</sup>·с;  $D_6$  – коэффициент диффузии компонентов термического разложения в воздухе, м<sup>2</sup>/с.

Уравнение баланса смеси окислителя с компонентами термического разложения:

$$C_g + C_o = 1, R_3 < r < R_5, Z_1 < z < Z_2,$$

где  $C_g$  – массовая концентрация компонентов термического разложения ( $0 < C_g < 1$ );  $C_o$  – массовая концентрация окислителя.

Массовая скорость химической реакции окисления определяется из выражения [7]:

$$W_o = \rho_6 C_o^n C_g^m k_6^0 \exp \left( - \frac{E_6}{RT_6} \right),$$

где  $k_6^0$  – предэкспонент химической реакции окисления, 1/с;  $E_6$  – энергия активации химической реакции окисления, Дж/моль;  $n, m$  – константы химической реакции (порядок реакции). Выбирается наиболее типичный случай – первый порядок ( $n=m=1$ ).

Начальные ( $t=0$ ) условия:

$$T = T_0, 0 < r < R_5, 0 < z < Z_2; \\ \phi = \phi_0, R_2 < r < R_3, 0 < z < Z_2, R_3 < r < R_4, 0 < z < Z_1;$$

$$C_g=0, R_3<r<R_5, Z_1<z<Z_2.$$

Граничные условия:

1. На оси симметрии и границ для всех уравнений выполняется условие нулевого градиента соответствующих функций:

$$z=0, 0<r<R_5; z=Z_2, 0<r<R_5; \frac{\partial T}{\partial z} = 0;$$

$$z=Z_2, R_3<r<R_5; \frac{\partial C_g}{\partial z} = 0;$$

$$r=0, 0<z<Z_2; r=R_5, 0<z<Z_2; \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r=R_5, Z_1<z<Z_2; \frac{\partial C_g}{\partial r} = 0.$$

2. Тепловое взаимодействие между слоями системы описывается граничными условиями четвертого рода:

$$r=R_1, 0<z<Z_2: T_1=T_2, -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r};$$

$$r=R_2, 0<z<Z_2: T_2=T_3, -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r};$$

$$r=R_3, 0<z<Z_1: T_3=T_4, -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r};$$

$$r=R_4, 0<z<Z_1: T_4=T_5, -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} = -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r}.$$

3. Поскольку тепловое разложение происходит не только на границе «воздух – оболочка», а по всей толщине разлагающихся слоев, то граничные условия на поверхности кабеля и герметика в зоне контакта с окислителем описываются:

$$r=R_3, Z_1<z<Z_2:$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} - q_3 \int_{r=R_2}^{r=R_3} \rho_3 \varphi_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right) dr = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial r},$$

$$-\rho_6 D_6 \frac{\partial C_g}{\partial r} = \int_{r=R_2}^{r=R_3} \rho_3 \varphi_3 k_3^0 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_3}\right) dr;$$

$$z=Z_1, R_3<r<R_4:$$

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} - q_4 \int_{z=0}^{z=Z_1} \rho_4 \varphi_4 k_4^0 \exp\left(-\frac{E_4}{RT_4}\right) dz = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z},$$

$$-\rho_6 D_6 \frac{\partial C_g}{\partial z} = \int_{z=0}^{z=Z_1} \rho_4 \varphi_4 k_4^0 \exp\left(-\frac{E_4}{RT_4}\right) dz.$$

4. Граничные условия на границе «стена – воздух»:

$$z=Z_1, R_4 < r < R_5:$$

$$T_5=T_6, -\lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z}, \frac{\partial C_g}{\partial z} = 0.$$

Система дифференциальных уравнений (1) – (7), описывающая процессы тепло-и массопереноса в рассматриваемой системе, с соответствующими начальными и граничными условиями решена методом конечных разностей [7]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использовался локально-одномерный метод [7]. Система одномерных разностных уравнений решалась методами итераций [7] и прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы [7]. Шаг по времени -  $\Delta t=1$  с, шаг по пространственным координатам -  $\Delta r=10^{-4}$  м,  $\Delta z=10^{-3}$  м. Оценка достоверности результатов в расчетах проведена проверкой консервативности схемы (расчет баланса энергии в расчетной области) [8–10].

Проводились численные исследования для кабеля с сечением 0,5 мм<sup>2</sup> меди, фарфоровой изоляции и эластомерной мембраной. Перегородка изготовлена из стали. Кабельная проходка, которой кабельное изделие закреплено в перегородке, выполнена из эластомерного материала. Температурное поле рассчитано для участка, равного четырем радиусам оболочки кабеля, так как на большем расстоянии температура практически неизменна.

Термофизические характеристики материалов для рассматриваемой системы :  $\lambda_1=384$  Вт/м·К,  $\lambda_2=1$  Вт/м·К,  $\lambda_3=0.16$  Вт/м·К,  $\lambda_4=0.16$  Вт/м·К,  $\lambda_5=46$  Вт/м·К,  $\lambda_6=0.026$  Вт/м·К,  $\rho_1=8800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=2300$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_3=1100$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_4=1100$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_5=7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_6=1.161$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_1=381$  Дж/кг·К,  $C_2=1200$  Дж/кг·К,  $C_3=1380$  Дж/кг·К,  $C_4=1380$  Дж/кг·К,  $C_5=460$  Дж/кг·К,  $C_6=1190$  Дж/кг·К,  $D_6=7.83 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

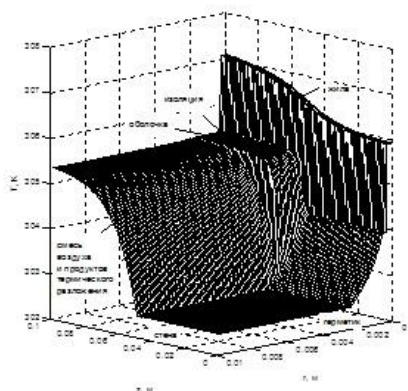
Геометрические размеры кабеля и перегородок:  $R_1=0.0004$  м,  $R_2=0.0007$  м,  $R_3=0.0019$  м,  $R_4=0.0025$  м,  $R_5=0.01$  м,  $Z_1=0.05$  м,  $Z_2=0.25$  м.

Параметры термического разложения материала оболочки и герметика:  $k^0=5 \cdot 10^{11}$  1/с,  $q=1.86$  МДж/кг,  $\varphi_0=0.4$ ,  $R=8.31$  Дж/моль·К,  $E=170$  кДж/моль.

Параметры реакции окисления:  $k^0=7 \cdot 10^9$  1/с,  $q=45$  МДж/кг,  $E=100$  кДж/моль.

Условия теплообмена с окружающей средой:  $T_0=300$  К,  $T^e=300$  К,  $\alpha=5$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

Задачей численных исследований в соответствии с представленной математической моделью было определение возможного воспламенения смеси продуктов термического разложения оболочки и типичных кабельных герметиков при различных токовых нагрузках. На рис. 2 показано температурное поле в системе при текущей токовой нагрузке 10 А.



*Рис.2. Распределение температуры в исследуемой системе при токовой нагрузке 10 А*

Найдено, что распределения температуры в системе практически не изменились в диапазоне нагрузок, при которых не реализуются условия зажигания. Зависимость максимальной температуры проводника при длительности перегрузки 1 час от силы тока приведена в таблице 1. Выявлено, что нагрузка, равная 25 А, представляет собой пороговое значение, так как температура смеси продуктов термического разложения с окислителем после 10 часов контакта достигает условий воспламенения, перечисленных ниже, но отличающихся тем, что концентрация газа по прежнему недостаточно высока для реализации зажигания.

Исследования показали, что при токе нагрузки более 25 А температура и концентрация смеси воздуха и продуктов термического разложения достигают критического значения, при котором происходит воспламенение. Зависимость времени задержки воспламенения  $t_d$  от силы тока показана в таблице 2. Анализ результатов численных исследований показал, что  $t_d$  варьируется от 1 часа 20 минут для 30 А до 1 минуты для 50 А. Найдено, что условия зажигания для всех текущих значений нагрузки реализованы практически при тех же параметрах – концентрация компонентов термического разложения в воздухе близка к 0.005 и температура смеси около 500 К. Максимальная температура достигается в области на расстоянии нескольких миллиметров от стены и поверхности кабеля. Наблюдается максимальная концентрация горючих компонентов.

Исследования показали, что при токе нагрузки более 25 А температура и концентрация смеси воздуха и продуктов термического разложения достигают критического значения, при котором происходит воспламенение. Зависимость времени задержки воспламенения  $t_d$  от силы тока показана в таблице 2. Анализ результатов численных исследований показал, что  $t_d$  варьируется от 1 часа 20 минут для 30 А до 1 минуты для 50 А. Найдено, что условия зажигания для всех текущих значений нагрузки реализованы практически при тех же параметрах – концентрация компонентов термического разложения в воздухе близка к 0.005 и температура смеси около 500 К. Максимальная температура достигается в области на расстоянии нескольких миллиметров от стены и поверхности кабеля. Наблюдается максимальная концентрация горючих компонентов.

*Таблица 1. Зависимость максимальной температуры жилы от текущей нагрузки*

|        |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| $I, A$ | 10  | 15  | 20  | 25  |
| $T, K$ | 310 | 325 | 348 | 450 |

Таблица 2. Зависимость времени задержки зажигания от текущей нагрузки

|           |      |      |      |     |     |
|-----------|------|------|------|-----|-----|
| $I$ , А   | 30   | 35   | 40   | 45  | 50  |
| $T_i$ , К | 4800 | 2200 | 1300 | 500 | 100 |

Разработанная модель тепломассообмена позволяет прогнозировать условия зажигания с целью предотвращения возгорания кабельных линий в промышленности. В то же время можно оценить условия теплопередачи кабельных линий, вентиляции и электрической предельной нагрузки для пожарной безопасности. Для выбранного кабеля нагрузочная способность составляет 11 А, температура длительного нагрева жил - 338 К, в эксплуатации при аварийном режиме (перегрузки) – 363 К. Установлено, что максимальная температура нагрева проводника при той же нагрузке - 307 К, что меньше предела.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (№ 14–39–00003).*

#### Список литературы:

1. Т. Ворзик. Подводные силовые кабели: проектирование, монтаж, ремонт, экологические аспекты. – Спрингер, Берлин. – 2009.
2. Руководство по пожарной безопасности для открытых сооружений в нефтяной, химической и перерабатывающей промышленности. – HQ, Сингапур. – 2011. – 48 с.
3. Д. Гувер, Л. Кодилл. Использование пожаробезопасных кабелей в пространствах. // Кабели. Установка и техническое обслуживание. – 1998. – № 6. – Т. 2. – 51 с.
4. М. Харди, Т. Светнум, М. Роллинс, Д. Лонг. Пожарные режимы во времени и пространстве: понимание грубого и мелкомасштабного пожарного узора. Борьба с природными пожарами. – Т. 10 (3–4). С. 329–342.
5. Д. Ажилу, А. Шарифан, Х. Бениафар, Прогнозирование термического разложения. Температура полимеров с использованием методов QSPR // Бюллетень корейского химического общества. – 2008. Т. 29. – № 10. – С. 2009 – 2016.
6. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
7. А.А. Самарский. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
8. G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, Int. J. Heat Mass Tran. 53, 923 (2010)
9. М.М. Grigoryeva, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, J. Eng. Thermophys. 20, 192 (2011)
10. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, Russ. J. Phys. Chem. B 8, 196 (2014)